

МЕТОД РАСЧЕТА ПОВЕРХНОСТНЫХ КОНДЕНСАЦИОННЫХ УТИЛИЗАТОРОВ

В теплоэнергетике все большее применение находят теплообменники для глубокого охлаждения продуктов сгорания энергетических установок с конденсацией водяного пара. В случае передачи теплоты чисто конвективным способом расчет теплообменных аппаратов не вызывает затруднений. Более сложными представляются процессы охлаждения газов с конденсацией содержащегося в них водяного пара.

В процессе конденсации пара массовый расход продуктов сгорания уменьшается в отличие от «сухого» теплообмена, где он постоянен. Поэтому изменение температуры по ходу газов не подчиняется строго экспоненциальной зависимости, характерной для «сухого» теплообменника, т. е. использование в расчете среднелогарифмического температурного напора приведет к погрешности.

В настоящей работе предлагается инженерный метод расчета рекуперативных теплообменных аппаратов с конденсацией водяного пара. Теплообменный аппарат представлен как совокупность элементарных участков, для каждого из которых решается система уравнений (1) – (11).

$$Q_{\Sigma} = k(t_r - t_s)F_{\Sigma}, \quad (1)$$

$$Q_{\Sigma} = G_s c_s (t_s'' - t_s'), \quad (2)$$

$$Q_{\Sigma} = Q_{\text{конв}} + Q_{\text{конд}}, \quad (3)$$

$$Q_{\text{конв}} = B(I_r' - I_r''), \quad (4)$$

$$Q_{\text{конд}} = r G_{\text{H}_2\text{O}} B, \quad (5)$$

$$r = f(t_{\text{ст}}), \text{ Дж/кг}, \quad (6)$$

$$t_{\text{ст}} = t_r - \frac{Q_{\Sigma}}{\alpha_{\Sigma} F_p}, \quad (7)$$

$$G_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{\beta_p (r_{\text{H}_2\text{O}} - r_{\text{ст}}) F_p}{B}, \quad (8)$$

$$G_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{18}{22,4} \cdot (V'_{\text{H}_2\text{O}} - V''_{\text{H}_2\text{O}}), \quad (9)$$

$$r_{\text{ст}} = f(t_{\text{ст}}), \quad (10)$$

$$V''_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{r''_{\text{H}_2\text{O}} V_{\text{ст}}}{1 - r''_{\text{H}_2\text{O}}}, \quad (11)$$

Итерационный расчет проводится на ЭВМ по параметрам t_r'' , t_s'' , $r''_{\text{H}_2\text{O}}$, $t_{\text{ст}}$ методом Ньютона. Здесь один «штрих» означает параметр на входе в рассматриваемый участок теплообменника, два «штриха» – на выходе; t_r , t_s и $r_{\text{H}_2\text{O}}$ –

средние на рассматриваемом участке температуры газов, воды, °С, и объемная концентрация водяного пара в потоке; $t_{\text{ст}}$ и $t_{\text{гт}}$ – температура газов, °С, и объемная концентрация водяных паров у стенки; $I_{\text{г}}$ – энтальпия газов, Дж/м³; $G_{\text{H}_2\text{O}}$, кг/м³; $Q_{\text{г}}$, Вт, $Q_{\text{конд}}$, Вт; r , Дж/кг; $V_{\text{H}_2\text{O}}$, м³/м³.

Как видно из уравнения (3), в конденсационном режиме, когда температура стенки ниже температуры точки росы, общий поток тепла от газов к стенке $Q_{\text{г}}$ складывается из потока тепла, обусловленного разностью температур $Q_{\text{конв}}$, и потока тепла конденсации паров $Q_{\text{конд}}$ за счет разности парциальных давлений пара в газах и на поверхности стенки.

В уравнении (1) $F_{\text{пл}}$ – «гладкая» площадь поверхности теплообмена, поскольку коэффициент теплопередачи k , Вт/(м²·К), мы рассчитываем, относим его к гладкой поверхности труб. В уравнении (7), напротив, используется площадь ребристой поверхности $F_{\text{р}}$, поскольку суммарный коэффициент теплоотдачи $\alpha_{\text{г}}$, Вт/(м²·К), относится нами на оребренную поверхность. Он рассчитывается следующим образом:

$$\alpha_{\text{г}} = \alpha_{\text{конв}} \left(1 + \frac{R_{\text{см}}}{R_{\text{п}}} \cdot \frac{r}{c_{\text{р}}} \cdot \frac{r_{\text{H}_2\text{O}} - r_{\text{ст}}}{t_{\text{г}} - t_{\text{ст}}} \right), \quad (12)$$

где $\alpha_{\text{конв}}$ – коэффициент теплоотдачи конвекцией от газов к стенке трубок, Вт/(м²·К); $R_{\text{см}}$ и $R_{\text{п}}$ – газовые постоянные газопаровой смеси и водяных паров, Дж/(кг·К); r – скрытая теплота парообразования, Дж/кг; $c_{\text{р}}$ – теплоемкость парогазовой смеси, Дж/(кг·К).

Уравнения (8) и (9) служат для определения количества образующегося конденсата $G_{\text{H}_2\text{O}}$, кг/м³. В этих формулах B – расход топливного газа, м³/с; $V_{\text{H}_2\text{O}}$, $V_{\text{гт}}$ – объемы водяных паров и сухих газов, м³/м³. Коэффициент массоотдачи $\beta_{\text{р}}$, кг/(м²·с), рассчитывается по формуле

$$\beta_{\text{р}} = \alpha_{\text{конв}} \frac{R_{\text{см}}}{R_{\text{п}} c_{\text{р}}}. \quad (13)$$

По изложенной методике нами рассчитываются ребристые теплообменники, устанавливаемые за паровыми и водогрейными котлами с целью глубокого охлаждения продуктов сгорания. Так, например, по нашим расчетам, установка двух четырехрядных теплообменников с размерами 1727 × 1575 × 180 мм за котлом паропроизводительностью 15 т/ч позволяет охладить газы со 180 до 30 °С, что дает 0,75 МВт теплоты за счет сухих газов и 0,89 МВт – за счет конденсации пара и позволяет получить 1,3 т/ч конденсата.

Программа расчета теплообменника позволяет анализировать влияние различных факторов на эффективность охлаждения продуктов сгорания, таких как коэффициент избытка воздуха в парогазовой смеси, толщина слоя загрязне-

ний на трубках теплообменника, коэффициент оребрения, температуры теплоносителей.